

DIALOG(R) File 351:Derwent WPI
(c) 2001 Derwent Info Ltd. All rts. reserv.

012795482 **Image available**
WPI Acc No: 1999-601712/199951
XRPX Acc No: N99-443607

**Projection exposure apparatus and reflection refraction optical system
for photolithography of semiconductors**

Patent Assignee: NIKON CORP (NIKR)
Inventor: TAKAHASHI T; TSUKAMOTO H
Number of Countries: 021 Number of Patents: 004
Patent Family:

Patent No	Kind	Date	Applicat No	Kind	Date	Week
WO 9952004	A1	19991014	WO 99JP1807	A	19990406	199951 B
JP 11354436	A	19991224	JP 9998180	A	19990405	200011
JP 2000195772	A	20000714	JP 98369233	A	19981225	200039
EP 1079253	A1	20010228	EP 99912115	A	19990406	200113
			WO 99JP1807	A	19990406	

Priority Applications (No Type Date): JP 98369233 A 19981225; JP 98111506 A 19980407

Patent Details:

Patent No	Kind	Lan	Pg	Main IPC	Filing Notes
WO 9952004	A1	J	118	G02B-017/08	
Designated States (National): US					
Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LU MC NL PT SE					
JP 11354436	A		12	H01L-021/027	
JP 2000195772	A		28	H01L-021/027	
EP 1079253	A1	E		G02B-017/08	Based on patent WO 9952004
Designated States (Regional): AT BE CH CY DE DK ES FI FR GB GR IE IT LI LU MC NL PT SE					

Abstract (Basic): WO 9952004 A1

NOVELTY - The projection exposure apparatus comprises an illumination optical system (3) impinging on a mask (4). The image of the mask pattern passes into a projection optical system (7), forming a final image on the sample (8). Light from the illumination system has a center wavelength below 180 nm. The projection optical system contains at least one concave mirror, maximum of 15 refraction lenses, and at least 4 aspherical surfaces.

DETAILED DESCRIPTION - An INDEPENDENT CLAIM is also included for a method of projection exposure using the apparatus.

USE - Photolithography of semiconductor samples.

DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The diagram shows a schematic side view of the exposure apparatus.

Illumination optics (3)

Mask (4)

Projection optics (7)

Sample (8)

pp; 118 DwgNo 3/26

Title Terms: PROJECT; EXPOSE; APPARATUS; REFLECT; REFRACT; OPTICAL; SYSTEM; PHOTOLITHOGRAPHIC; SEMICONDUCTOR

Derwent Class: P81; P84; U11

International Patent Class (Main): G02B-017/08; H01L-021/027

International Patent Class (Additional): G02B-013/18; G02B-013/24;

G03F-007/20; G03F-007/207

File Segment: EPI; EngPI

Manual Codes (EPI/S-X): U11-C04E1

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2000-195772
(P2000-195772A)

(43) 公開日 平成12年7月14日 (2000.7.14)

(51) Int.Cl. ¹	識別記号	F I	テマコード (参考)
H 0 1 L 21/027		H 0 1 L 21/30	5 1 5 D 2 H 0 8 7
G 0 2 B 13/18		G 0 2 B 13/18	5 F 0 4 6
	13/24		
	17/08		A
G 0 3 F 7/207		G 0 3 F 7/207	H

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 28 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願平10-369233

(22) 出願日 平成10年12月25日 (1998.12.25)

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 塚本 宏之

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72) 発明者 高橋 友刀

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

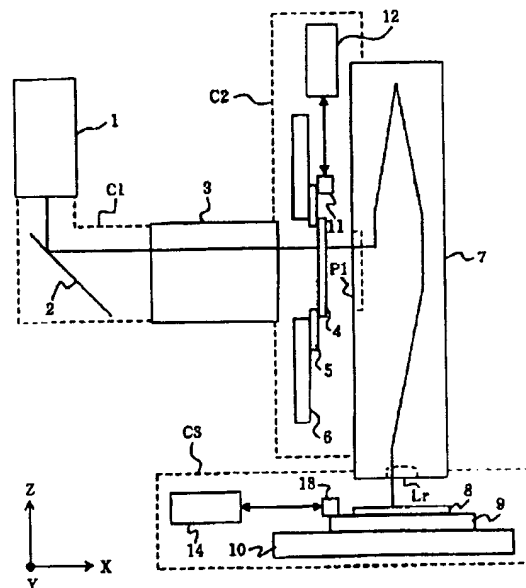
(74) 代理人 100095256

弁理士 山口 孝雄

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 投影露光装置

(57) 【要約】

【課題】 F_2 レーザ光のような短波長光に対してレンズ枚数の少ない構成で色収差が良好に補正された投影露光装置。【解決手段】 照明光学系 (3) は、180nm以下の中心波長を有し且つ20 μ m以下の半値全幅を有する照明光を供給するように構成されている。投影光学系 (7) は、レンズ成分と凹面反射鏡とを含み、レンズ成分および凹面反射鏡は、照明光に対する投影光学系の色収差を実質的に補正するように位置決めされている。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 パターンが形成されたマスクを照明するための照明光学系と、前記マスクからの光に基づいて前記パターンの像を感光性基板上に形成するための反射屈折型の投影光学系とを備えた投影露光装置において、前記照明光学系は、180nm以下の中心波長を有し且つ20 μ m以下の半値全幅を有する照明光を供給するように構成され、

前記投影光学系は、レンズ成分と凹面反射鏡とを含み、前記レンズ成分および前記凹面反射鏡は、前記照明光に対する前記投影光学系の色収差を実質的に補正するように位置決めされていることを特徴とする投影露光装置。

【請求項2】 パターンが形成されたマスクを照明するための照明光学系と、前記マスクからの光に基づいて前記パターンの像を感光性基板上に形成するための反射屈折型の投影光学系とを備えた投影露光装置において、前記照明光学系は、180nm以下の中心波長を有し且つ所定値以下の半値全幅を有する照明光を供給するように構成され、

前記投影光学系は、屈折力を有する光学部材と、前記マスクに近接して配置されて前記屈折力を有する光学部材を外部の雰囲気と隔てるための光透過性の光学部材を有し、

前記投影光学系の光軸と平行な方向に沿った前記マスクと前記光透過性の光学部材との間の間隔は50mm以下に設定されていることを特徴とする投影露光装置。

【請求項3】 前記照明光の半値全幅は20 μ m以下であることを特徴とする請求項2に記載の投影露光装置。

【請求項4】 前記投影光学系を構成するすべてのレンズ成分および凹面反射鏡が共通の光軸に沿って配置されていることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の投影露光装置。

【請求項5】 前記投影光学系は、ただ1つの凹面反射鏡、複数のレンズ成分、および1つまたは複数の平面反射鏡のみから構成されていることを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の投影露光装置。

【請求項6】 前記照明光の半値全幅は2 μ m以下であることを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項に記載の投影露光装置。

【請求項7】 前記投影光学系は、前記マスクからの光に基づいて前記パターンの一次像を形成するための第1結像光学系と、前記一次像からの光に基づいて前記パターンの二次像を前記感光性基板上に形成するための第2結像光学系とを有することを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項に記載の投影露光装置。

【請求項8】 前記第1結像光学系のレンズの最大有効径を h_1 とし、前記第2結像光学系のレンズの最大有効径を h_2 としたとき、

$$0.7 < h_1 / h_2 < 1.4$$

の条件を満足することを特徴とする請求項7に記載の投

影露光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は投影露光装置に関し、特に半導体素子などをフォトリソグラフィ工程で製造する際に使用される投影露光装置であって、反射屈折型の投影光学系を有する投影露光装置に関する。

【0002】

【従来の技術】LSIなどの集積回路の作製に際して、縮小投影露光装置が広く用いられている。縮小投影露光装置では、投影光学系を介してマスクパターンの縮小像を感光性基板であるウエハ上に形成する。近年では、半導体基板上に投影露光する集積回路のパターンがますます微細化しており、投影露光装置の解像度をさらに向上させることが要求されている。

【0003】投影露光装置の解像度をさらに向上させるには、投影光学系の開口数(NA)を大きくすることや、露光波長を短くすることが必要とされる。しかしながら、投影光学系のNAを所定の値以上に大きくすることは光学系の構成上難しい。また、投影光学系のNAを大きくすると利用することのできる焦点深度が小さくなり、その結果、理論上可能な分解能を実現することが困難となる。このため、現実的には、投影露光装置の解像度を向上させるために露光波長を短くすることが特に強く求められている。

【0004】従来、露光光源として、波長が248nmのKrFエキシマレーザや波長が193nmのArFエキシマレーザが提案され、且つ実施されている。また、さらに波長の短い180nm以下の光源の利用も検討されつつあり、特にF₂レーザ(波長157.6nm)の利用が有望であるとされている。ところが、これらの短波長光に対して使用することのできる屈折光学材料は限られている。すなわち、180nm以下の波長光に対して良好な透過率を有する物質としてはCaF₂(フッ化カルシウム)やMgF₂(フッ化マグネシウム)やLiF(フッ化リチウム)などが知られているが、このうちMgF₂は複屈折性を有し、LiFには潮解性がある。このため、180nm以下の波長光に対して実用的な屈折光学材料として、CaF₂結晶(蛍石)が知られているのみである。

【0005】そこで、屈折光学部材としては単一の硝材(光学材料)しか使用することのできない状況下でレーザ光の有する波長幅によって生じる色収差を除去するために、様々なタイプの反射屈折型の縮小投影光学系がこれまでに提案されている。たとえば、米国特許第4,747,678号公報には、多数の反射面を利用するタイプの光学系が開示されている。また、米国特許第4,953,960号公報には、ビームスプリッタプリズムを利用するタイプの光学系が開示されている。さらに、特開平10-104513号公報には、開口の中央に遮蔽

を有するタイプの光学系が開示されている。また、特開平8-334695号公報には、一枚の凹面反射鏡を有するタイプの光学系が開示されている。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上述のタイプの反射屈折型投影光学系には、以下のような不都合な点が存在する。まず、米国特許第4,747,678号公報に開示されたタイプの投影光学系では多数の反射面が利用されているが、180nm以下の短波長光に対する反射面の反射率が低いため、多数の反射面における光量損失が大きく、露光速度（スループット）が低下してしまう。さらに、感光性基板上において使用可能な像領域すなわち使用可能領域が狭いため、実際に露光に使用する領域として矩形の露光領域を確保することが困難である。

【0007】また、米国特許第4,953,960号公報に開示されたタイプの投影光学系では大きな偏光ビームスプリッタプリズムを使用しているが、180nm以下の短波長光に対して高い透過率を有するプリズムを製造することは困難である。加えて、180nm以下の短波長光に対して偏光分離を行うための偏光反射膜や波長板を製造することは困難である。さらに、特開平10-104513号公報に開示されたタイプの投影光学系では、結像光学系の光路中において結像光束の一部が反射鏡の中央開口部で遮られる。その結果、形成される像の忠実度が低下し、回路パターンを高精度に転写するには不利となる。

【0008】これに対して、特開平8-334695号公報に開示されたタイプの投影光学系は、光軸から外れた領域を光路として使用する、いわゆる軸外し光学系である。このため、光軸を含む領域を光路として利用するタイプの光学系と比べると、像面積を広く確保することが比較的難しいという不都合がある。その一方で、光量の低下が少なく、結像光束の遮蔽がないために像質が良く、各光学部材の製作が他のタイプに比して容易である、という利点を有する。

【0009】ところで、 F_2 レーザの場合、その発振波長帯において光量損失の小さい屈折光学部材や反射光学部材が存在しない。したがって、 F_2 レーザに対して大掛かりな狭帯域化をすることは、 KrF エキシマレーザや ArF エキシマレーザなどの場合に比べて困難であるとされている。また、実用化されている F_2 レーザの強度が弱い場合、狭帯域化を行うことにより、露光光の強度が、ひいては露光速度がさらに低下し易い。換言すると、 F_2 レーザの場合、狭帯域化による露光速度の低下の影響は他のレーザの場合に比べて大きい。

【0010】しかしながら、波長157.6nmの F_2 レーザの自然波長幅は ArF エキシマレーザなどの自然波長幅よりもかなり小さいため、わずかな狭帯域化を施すことにより F_2 レーザの半値全幅を20pm程度以下

にすることができる。例えば、ラムダフィジック社（ドイツ）のNovaLine TMF500 では、比較的簡単な狭帯域化により、半値全幅が10pmで出力が10Wの F_2 レーザを実用化している。そこで、露光光源として F_2 レーザを用いる投影露光装置では、露光効率を上げるとともに、狭帯域化によるレーザ装置の複雑化を避けるために、この程度の半値全幅を有するレーザ光を使用することが望ましい。この場合、投影光学系では、10pm～20pm程度の波長幅に亘って従来よりも広帯域で色収差を除去しなければならない。なお、 F_2 レーザに関しては、狭帯域化素子の追加により、半値全幅2pm程度までの狭帯域化も可能である。

【0011】ところが、前述したように、180nm以下の波長域において唯一硝材として利用することができるのが CaF_2 であるが、単一の硝材のみで色収差を十分に除去することは困難である。また、この波長域では CaF_2 で形成されたレンズ成分において内部吸収や表面反射などが起こるため、レンズ成分の枚数を多くすると光学系の光透過率が著しく低下してしまう。

【0012】また、たとえば F_2 レーザ光のような180nm以下の短波長光は、空気（酸素）による吸収率が高い。そのため、たとえば F_2 レーザを露光光源として用いる投影露光装置では、空気による光吸収を回避して光学系の透過率の低下を避けるために、露光光（照明光）を吸収しにくい気体、すなわちヘリウム等の不活性ガスで光学系内の空気を置換する必要がある。

【0013】本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、 F_2 レーザ光のような短波長光に対してレンズ枚数の少ない構成で色収差が良好に補正された反射屈折型の投影光学系を有する投影露光装置を提供することを目的とする。また、 F_2 レーザ光のような短波長光の空気による光吸収を良好に回避することによって投影光学系の高い透過率を確保することのできる投影露光装置を提供することを目的とする。

【0014】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するために、本発明の第1発明では、パターンが形成されたマスクを照明するための照明光学系と、前記マスクからの光に基づいて前記パターンの像を感光性基板上に形成するための反射屈折型の投影光学系とを備えた投影露光装置において、前記照明光学系は、180nm以下の中心波長を有し且つ20pm以下の半値全幅を有する照明光を供給するように構成され、前記投影光学系は、レンズ成分と凹面反射鏡とを含み、前記レンズ成分および前記凹面反射鏡は、前記照明光に対する前記投影光学系の色収差を実質的に補正するように位置決めされていることを特徴とする投影露光装置を提供する。

【0015】また、本発明の第2発明では、パターンが形成されたマスクを照明するための照明光学系と、前記マスクからの光に基づいて前記パターンの像を感光性基

板上に形成するための反射屈折型の投影光学系とを備えた投影露光装置において、前記照明光学系は、180nm以下の中心波長を有し且つ所定値以下の半値全幅を有する照明光を供給するように構成され、前記投影光学系は、屈折力を有する光学部材と、前記マスクに近接して配置されて前記屈折力を有する光学部材を外部の雰囲気と隔てるための光透過性の光学部材を有し、前記投影光学系の光軸と平行な方向に沿った前記マスクと前記光透過性の光学部材との間の間隔は50mm以下に設定されていることを特徴とする投影露光装置を提供する。第2発明の好ましい態様によれば、前記光透過性の光学部材は平行平板である。また、前記照明光の半値全幅は20 μ m以下であることが好ましい。

【0016】さらに、第1発明および第2発明の好ましい態様によれば、前記投影光学系を構成するすべてのレンズ成分および凹面反射鏡が共通の光軸に沿って配置されている。また、前記投影光学系は、ただ1つの凹面反射鏡、複数のレンズ成分、および1つまたは複数の平面反射鏡のみから構成されていることが好ましい。さらに、前記照明光の半値全幅は2 μ m以下であることが好ましい。また、前記投影光学系を介して前記感光性基板上で規定される露光領域は矩形状であることが好ましい。

【0017】さらに、第1発明および第2発明の好ましい態様によれば、前記投影光学系は、前記マスクからの光に基づいて前記パターン的一次像を形成するための第1結像光学系と、前記一次像からの光に基づいて前記パターンの二次像を前記感光性基板上に形成するための第2結像光学系とを有する。この場合、前記第1結像光学系のレンズの最大有効径を h_1 とし、前記第2結像光学系のレンズの最大有効径を h_2 としたとき、 $0.7 < h_1/h_2 < 1.4$

の条件を満足することが好ましい。

【0018】

【発明の実施の形態】一般に、反射屈折型の光学系では、屈折光学系において必然的に生じることになる軸上色収差を、反射屈折光学系の負レンズにより発生する反対方向の色収差で相殺（キャンセル）することによって、色収差を良好に補正することができる。したがって、色収差の補正を良好に行うためには、屈折光学系で発生する色収差を抑えるか、あるいは反射屈折光学系の負レンズの色収差補正効果を強める必要がある。

【0019】近軸収差論によると、軸上色収差の発生量は概して、レンズのパワー（屈折力）に比例し、近軸周辺光線の入射高の2乗に比例する。そこで、反射屈折光学系の負レンズの色収差補正効果を強めるには、負レンズのパワーを強めるか、あるいは負レンズへの入射光束を太くすれば良いことになる。

【0020】しかしながら、負レンズのパワーを強めた場合、レンズ面の曲率半径が小さくなり、光線の入射角

が大きくなる。その結果、高次収差が発生し、色収差以外の収差を除去することが困難となる。ただし、負レンズのパワーを強めた場合の収差に関しては、非球面を導入することによりかなり効果的に収差を除去することができる。一方、負レンズへの入射光束を太くした場合、軸上色収差を比較的容易に除去することができる。しかしながら、負レンズへの入射光束を太くすると、レンズや反射鏡等の光学素子が大きくなり、その光学素子を所要の精度で製作することが困難となる。したがって、負レンズへの入射光束を太くすることには限界がある。

【0021】次に、屈折光学系において軸上色収差があまり発生しないようにするには、反射屈折光学系の場合とは逆に、レンズのパワーを弱めるか、あるいはレンズへの入射光束が太くならないように構成すれば良い。そのためには、他のレンズへの入射光束を太くし且つ必要な正レンズのパワーを増加させることになる負レンズの存在は不利であり、屈折光学系における負レンズの使用は控えめにすべきである。ただしその場合、球面レンズのみでは球面収差などの除去ができないので、非球面を使用することが必要となる。非球面を導入すると、球面系よりも少ないレンズ枚数で収差を抑えることができるという利点もある。しかしながら、非球面を導入したとしても正レンズだけではベッツバール和を調節することができないため、像面湾曲収差は必然的に生じることになる。ただし、像面湾曲に関しては、反射屈折光学系の凹面反射鏡や負レンズの効果により打ち消すことができる。

【0022】一方、空気による光の吸収を避けるためには、マスク（レチクル）やウエハを含む光学系全体を気密状態に構成し、光を吸収しにくいヘリウム等の不活性ガスに置換することが好ましい。しかしながら、投影露光装置の使用中にマスクやウエハは移動を繰り返すため、マスクやウエハを含む光学系全体を気密状態に構成することは困難である。そこで、マスクの近傍およびウエハの近傍に光透過性の光学部材を配置し、屈折力を有する他の光学部材（レンズ、凹面反射鏡、凸面反射鏡、回折光学素子などを含む）を外部の雰囲気と隔てるために、マスク近傍の光学部材からウエハ近傍の光学部材までの間を気密状態に保つように構成することが現実的である。

【0023】一般に、投影光学系ではウエハに近接してレンズが配置されるので、本発明ではマスクの近傍に光透過性の光学部材を付設する。なお、光透過性の光学部材としては、レンズを使用してもよいし平行平板を使用してもよい。ただし、加工や取り扱いの容易な平行平板を使用すれば、表面が汚れたときなどでも光学系の性能を保ちつつ比較的容易に平行平板を交換することができる。投影光学系の内部を気密状態に保った場合、汚れが付着するのは外部に露出している部分、すなわちマスク側の平行平板やウエハ側のレンズに限られ

る。本発明では、汚れが付着し易いマスク側の平行平面板を交換することにより、投影光学系の耐久性や保守性を向上させることができる。

【0024】さらに、投影光学系の組立ておよび粗調整が完了した後でも、マスクの近傍に配置した平行平面板の表面に微小加工を施すことにより、投影光学系に残留した諸収差を補正することが可能である。特に、縮小型の投影光学系の場合は、マスクの近傍に配置した平行平面板を微小加工をすることにより、歪曲収差を効果的に補正することができる。なお、必要に応じて、ウエハの近傍にも平行平面板を付設することができる。この場合、ウエハの近傍に配置された平行平面板を微小加工をすることにより、球面収差やコマ収差を効果的に補正することができる。

【0025】図1は、本発明にかかる投影露光装置の投影光学系の基本的な構成を概念的に説明する概念図である。図1に示すように、本発明の投影光学系は、中間像Iを挟んで前側（マスク側）部分の反射屈折光学系Aと、後側（ウエハ側）部分の屈折光学系Bとから構成されている。すなわち、マスクRからの光に基づいて反射屈折光学系Aからなる第1結像光学系により中間像Iが形成され、中間像Iからの光に基づいて屈折光学系Bからなる第2結像光学系によりウエハW上にマスクパターン像が形成される。

【0026】投影光学系の光軸は凹面反射鏡により折り返され、あるいは光路分離のために配置される反射面（図1では不図示）により折り曲げられることはあるが、光路分離用の反射面を除くすべての反射光学部材および屈折光学部材は光軸上に配置されている。以下、反射屈折光学系Aおよび屈折光学系Bの説明に際して、光路折り曲げ用の反射面の存在を除いて考えるものとする。反射屈折光学系Aは、複数枚のレンズ（G1、G2）と、1枚の凹面反射鏡（M）とからなる。反射屈折光学系Aの光軸は、凹面反射鏡Mによって折り返されている。凹面反射鏡Mでの光路の折り返しによる光線の干渉を避けるために、すなわち凹面反射鏡Mへの入射光と凹面反射鏡Mからの射出光とを分離するために、物体面であるマスクR面を光軸から外す（偏心させる）必要がある。また、マスクRの光軸からの偏心に対応して、ウエハW面も光軸から偏心させる必要がある。

【0027】また、収差の発生を良好に抑えるために、反射屈折光学系Aの開口絞りSに相当する位置の近傍に凹面反射鏡Mを配置し、凹面反射鏡Mを中心としてほぼ対称で且つほぼ等倍の光学系とすることが好ましい。反射屈折光学系Aにおいて凹面反射鏡Mに最も近い位置には、全体として負の屈折力を有するレンズ群G2が配置されている。なお、本明細書において、レンズ群とは、1枚の単レンズも包含するような広い概念である。この負レンズ群G2により、屈折光学系Bで発生する軸上色収差を良好に補正する。広視野の投影光学系において広

帯域で色収差を良好に補正するには、負レンズ群G2は非球面レンズを利用するか、あるいは複数枚のレンズを使用することが望ましい。

【0028】負レンズ群G2とマスクRとの間の光路中には、全体として正の屈折力を有する正レンズ群（少なくとも一枚の正レンズからなるレンズ群）G1が配置されている。正レンズ群G1は、マスクRからの光束にテレセントリシティを持たせる機能を有し、これにより、物体側（マスク側）のフォーカスの変動に対する耐性を持たせることができる。また、歪曲収差を除去したり、中間像Iにおいて像面湾曲収差が発生し過ぎないようにするためにも、正レンズ群G1は有用である。反射屈折光学系Aにより形成される中間像Iでは、色収差を除く諸収差が良好に補正されていることが好ましい。しかしながら、反射屈折光学系Aを構成するレンズの枚数を減らした場合には、中間像Iにおいて像面湾曲などの収差がある程度残存することはやむを得ない。

【0029】一方、屈折光学系Bは、開口絞りSを挟んでマスク側に配置された正レンズ群G3とウエハ側に配置された正レンズ群G4とから構成されている。すなわち、屈折光学系Bは、凹面反射鏡を含むことなくレンズのような屈折光学部材のみからなる光学系である。反射屈折光学系Aでは凹面反射鏡により光路が折り返されるため光路中に開口絞りを配置することができないので、投影光学系の開口絞りSは屈折光学系Bの光路中に配置されている。

【0030】前述のように、屈折光学系Bにおける軸上色収差の発生を良好に抑えるためには、レンズへの入射光束が太くなりすぎないようにすることが有利である。しかしながら、この場合にもレンズのパワーを強めることにより諸収差が発生するので、レンズの有効径の大きさは次の条件式（1）を満足することが好ましい。

$$0.7 < h1/h2 < 1.4 \quad (1)$$

ここで、 $h1$ は、第1結像光学系である反射屈折光学系Aのレンズの最大有効径である。また、 $h2$ は、第2結像光学系である屈折光学系Bのレンズの最大有効径である。

【0031】条件式（1）の下限値を下回ると、 $h1/h2$ の値が小さくなりすぎて、色収差の除去が困難となるので好ましくない。一方、条件式（1）の上限値を上回ると、 $h1/h2$ の値が大きくなりすぎて、屈折光学系Bで球面収差等の補正が困難となるか、または反射屈折光学系Aの光学部材が大きくなりすぎて製作が困難となるので、好ましくない。なお、条件式（1）を満たす範囲内であっても、屈折光学系Bでの収差補正のためには非球面を用いることが有利である。

【0032】上述したように、図1に示す本発明の投影光学系では、反射屈折光学系AにおいてマスクRから凹面反射鏡Mへ入射する光束と凹面反射鏡Mで反射されて屈折光学系Bへ向かう光束とを分離する必要がある。そ

の結果、図2に示すように、ウエハW面上において像形成に使用し得る領域すなわち使用可能領域FRは、収差の取り除かれた光軸AXを中心とする円形領域のうちの半分の領域となる。そして、本発明において実際に露光に使用する露光領域ERは、たとえば半円状の使用可能領域FRから光軸AXに近い境界領域部分などを取り除いた矩形の領域となる。これに対応して、投影光学系を介してマスクR上で規定される視野領域（照明領域）も矩形となる。

【0033】また、本発明では、マスクRの近傍に平行平板のような光透過性の光学部材P1を配置している。具体的には、投影光学系の光軸（あるいは光軸と平行な方向）に沿ったマスクRと平行平板P1との間の間隔は50mm以下に設定されている。必要に応じて、ウエハWの近傍に平行平板のような光透過性の光学部材P2を配置することもできる。したがって、マスクRの近傍に配置された平行平板P1からウエハWの近傍に配置された平行平板P2（あるいは最もウエハ側のレンズ）までの光学系内部を気密状態に保ち、露光光を吸収しにくいヘリウム（He）や窒素（N₂）などの不活性ガスで光学系内部に満たすことができる。

【0034】すなわち、マスクRと平行平板P1との間の狭い光路およびウエハWとこれに近接する光学部材との間の狭い光路を除き、マスクRからウエハWまでの光路のほぼ全部を、光吸収しにくいヘリウムなど不活性ガスで満たすことができる。その結果、露光光としてF₂レーザ光のような短波長光を用いても、光の吸収を有効に回避することができ、投影光学系の透過効率を向上させることができる。ここで、露光光としてF₂レーザ光のような180nm以下の波長の短波長光を用いる場合には、マスクRと平行平板P1との間の狭い光路およびウエハWとこれに近接する光学部材との間の狭い光路についても不活性ガスが充填されることになる。しかしながら、これらの光路には、移動可能なマスクステージ6や移動可能なウエハステージ10が配置され、これらの可動部材からの発塵やグリズなどの飛散の影響により、この不活性ガス自体のクリーン度（清浄度）が投影光学系内部の光路（平行平板P1から平行平板P2または最もウエハ側のレンズまでの光路）のクリーン度に比べて低下する恐れが大きい。従って、マスクRからウエハWまでの光路の全てが不活性ガスで充填されていたとしても、本発明ではクリーン度の低い光路を非常に短くできる、言い換えればクリーン度の低い光路を分離できるため、光量損失低減の効果をさらに向上できる。ここで、マスクRと平行平板P1（マスクに近接して配置されて屈折力を有する光学部材を外部の雰囲気から隔てるための光学部材）との光軸に平行な方向に沿った間隔が50mmを超えて長くなると、上述のようにクリーン度の低い光路が長くなり過ぎて、光量損失が増大する恐れが高くなるため好ましくない。また、マスクRと

平行平板P1との光軸に平行な方向に沿った間隔が1mm以下となる場合には、平行平板P1とマスクステージとを干渉させないようにマスクステージを設計することが非常に困難となり、マスクステージ自体の精度を向上させることが困難となるため好ましくない。また、マスクRと平行平板P1との光軸に平行な方向に沿った間隔が5mm以下となる場合には、マスクステージの精度を維持しつつマスクRと平行平板P1とを干渉させない設計が要求されるため好ましくない。また、マスクRと平行平板P1との光軸に平行な方向に沿った間隔が20mm以下となる場合には、現存のマスクステージの小改良では、マスクRと平行平板P1との干渉を避けられないため好ましくない。また、前述のように、平行平板の使用により、投影光学系の耐久性および保守性を向上させ、投影光学系の組立後に残存収差の補正を行うこともできる。

【0035】以下、本発明の実施例を、添付図面に基いて説明する。

〔第1実施例および第2実施例〕図3は、本発明の第1実施例および第2実施例にかかる投影露光装置の全体構成を概略的に示す図である。なお、図3において、ウエハ面の法線方向にZ軸を、ウエハ面内において図3の紙面に平行にX軸を、紙面に垂直にY軸を設定している。図示の投影露光装置において、F₂レーザ（共振中心波長157.6nm）1からZ方向に射出された光は、折り曲げミラー2でX方向に偏向された後、照明光学系3を介してマスク4を均一に照明する。なお、図3では、光源1から照明光学系3までの光路に1枚の折り曲げミラー2しか図示していないが、実際には、光源1と投影露光装置本体とが別体である場合に、光源1からのF₂レーザ光の向きを常に投影露光装置本体へ向ける自動追尾ユニットや、光源1からのF₂レーザ光の光束断面形状を所定のサイズ・形状に整形するための整形光学系、光量調整部などの光学系が配置される。また、図3に示した照明光学系3は、例えばフライアイレンズや内面反射型インテグレートタからなり所定のサイズ・形状の面光源を形成するオプティカルインテグレートタや、マスク4上での照明領域のサイズ・形状を規定するための視野絞り、この視野絞りの像をマスク上へ投影する視野絞り結像光学系などの光学系を有している。図3の例では、光源1と照明光学系3との間はケーシングC1で密封されており、光源1から照明光学系3中の最もマスクR側の光学部材までの空間はヘリウムガスなどの不活性ガスで置換されている。なお、光路の折り曲げ方は図3に示される態様には限られず、装置の設計に合わせて適宜変更可能であることは言うまでもない。

【0036】マスク4は、マスクホルダ5を介して、マスクステージ6上においてYZ平面に平行に保持されている。マスク4には転写すべきパターンが形成されており、パターン領域全体のうちZ方向に沿って長辺を有し

且つY方向に沿って短辺を有する矩形状のパターン領域が照明される。マスクステージ6は、図示を省略した駆動系の作用によりマスク面(すなわちYZ平面)に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はマスク移動鏡11を用いた干渉計12によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【0037】マスク4に形成されたパターンからの光は、投影光学系7を介して、感光性基板であるウエハ8上にマスクパターン像を形成する。ウエハ8は、ウエハホルダ9を介して、ウエハステージ10上においてXY平面に平行に保持されている。そして、マスク4上での矩形状の照明領域に光学的に対応するように、ウエハ8上ではX方向に沿って長辺を有し且つY方向に沿って短辺を有する矩形状の露光領域にパターン像が形成される。ウエハステージ10は、図示を省略した駆動系の作用によりウエハ面(すなわちXY平面)に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はウエハ移動鏡13を用いた干渉計14によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【0038】また、図示の投影露光装置では、投影光学系7を構成する光学部材のうち最もマスク側に配置された平行平板P1と最もウエハ側に配置されたレンズLrとの間で投影光学系7の内部が気密状態を保つように構成され、投影光学系7の内部の気体は露光光の吸収率が低い気体であるヘリウムガスで置換されている。同様に、光源1から照明光学系3までの光路もヘリウムガスで置換されている。そして、照明光学系3と平行平板P1との間の狭い光路には、マスク4及びマスクステージ6が配置されるが、これらマスク4及びマスクステージ6を密封包囲するケーシングC2の内部に窒素やヘリウムガスなどの不活性ガスを充填することにより、上記照明光学系3と平行平板P1との間の光路が不活性ガスで置換される。また、レンズLrとウエハ8との間の狭い光路には、ウエハ8及びウエハステージ10などが配置されるが、これらウエハ8及びウエハステージ10を密封包囲するケーシングC3の内部に窒素やヘリウムガスなどの不活性ガスを充填することにより、上記レンズLrとウエハ8との間の狭い光路が不活性ガスで置換される。ただし、これらの光路においては、機械的に可動する部材(マスクステージ6、ウエハステージ10など)が配置されているため、これらの部材が移動することによる気体のクリーン度の低下は避けがたい。なお、マスクを交換するためのロボットアームやウエハを交換するためのロボットアームは、上記光路のクリーン度を

向上させるために、これらのケーシングC2、C3とは別体のケーシング内に収められることが好ましいが、それでも投影光学系7の内部気体のクリーン度よりは低くなりがちである。このように、光源1からウエハ8までの光路において露光光がクリーン度の低い気体を通ずる箇所は、照明光学系3とマスク4との間の狭い光路中、マスク4と平行平板P1との間の狭い光路中およびレンズLrとウエハ8との間の狭い光路中である。

【0039】上述したように、投影光学系7によって規定されるマスク4上の視野領域(照明領域)およびウエハ8上の投影領域(露光領域)は、Y方向に沿って短辺を有する矩形状である。したがって、駆動系および干渉計(12、14)などを用いてマスク4およびウエハ8の位置制御を行いながら、矩形状の露光領域および照明領域の短辺方向すなわちY方向に沿ってマスクステージ6とウエハステージ10とを、ひいてはマスク4とウエハ8とを同期的に移動(走査)させることにより、ウエハ8上には露光領域の長辺に等しい幅を有し且つウエハ8の走査量(移動量)に応じた長さを有する領域に対してマスクパターンが走査露光される。このように、第1実施例および第2実施例では、マスク面とウエハ面とが直交しているが、その走査方向が水平方向になるように設定されている。

【0040】各実施例(後述の第3実施例および第4実施例も含めて)において、投影光学系7を構成するすべてのレンズ成分および平行平板には蛍石(CaF_2 結晶)を使用している。また、露光光である F_2 レーザ光の発振中心波長は157.6nmであり、157.6nm付近では CaF_2 の屈折率は、+1pmの波長変化あたり -2.4×10^{-6} の割合で変化し、-1pmの波長変化あたり $+2.4 \times 10^{-6}$ の割合で変化する。また、ウエハ8上の露光領域ERは25mm×6.6mmの矩形状であり、光軸AXから露光領域ERまでの距離LXは4mmである(図2参照)。すなわち、各実施例の投影光学系による露光領域ERは光軸AXから偏心した位置にある。

【0041】また、各実施例において、非球面は、光軸に垂直な方向の高さをyとし、非球面の頂点における接平面から高さyにおける非球面上の位置までの光軸に沿った距離(サグ量)をzとし、頂点曲率半径をrとし、円錐係数を κ とし、n次の非球面係数を C_n としたとき、以下の数式(a)で表される。

【数1】

$$z = (y^2 / r) / [1 + \{1 - (1 + \kappa) \cdot y^2 / r^2\}^{1/2}] + C_4 \cdot y^4 + C_6 \cdot y^6 + C_8 \cdot y^8 + C_{10} \cdot y^{10} \quad (a)$$

各実施例において、各非球面の円錐係数 κ はすべて0である。また、非球面状に形成されたレンズ面には面番号の右側に*印を付している。

【0042】なお、露光光に対する透過率の点ではLi

Fも使用可能であるが、潮解性を有するLiFを照明光学系3および投影光学系7に使用するのとは極めて困難である。また、 MgF_2 は複屈折性を有するので、これを投影光学系7に使用することはできないが、照明光学系

3では多少の複屈折があっても構わないので、照明光学系3には CaF_2 からの光学部材の他に MgF_2 からの光学部材を使用することもできる。

【0043】(第1実施例)図4は、第1実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面(像面)とを結ぶ光軸を含みマスク面(物体面)に垂直な平面に沿った断面図である。また、図5は、図4に対応する図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面(像面)とを結ぶ光軸を含みマスク面に平行な平面に沿った断面図である。ただし、図5では、図面の明瞭化のために、反射鏡M1を省略し、反射鏡M1からマスクR(図3では参照符号4に対応)までの光路を紙面上で展開している。第1実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が2 μm の露光光に対して色収差を含む諸収差が補正された投影光学系に本発明を適用している。

【0044】図示の投影光学系では、特開平8-334695号公報に開示された光学系から中間像形成位置の近傍に配置された反射鏡を取り除き、その代わりにマスクRの近傍に配置された平行平板P1の直ぐ後側(ウエハ側)に反射鏡M1を配置して光軸を折り曲げることで、より光路の分離を確保している。第1実施例の投影光学系の場合、マスクRの近傍に配置された平行平板P1およびその直後の反射鏡M1を除き、反射屈折光学系Aおよび屈折光学系Bを構成するすべてのレンズ成分および凹面反射鏡M2が同一の光軸上に配置されるため、光学系の組立てや調整が容易であるという利点を有する。

【0045】第1実施例の投影光学系は、マスクRに近接して配置された平行平板P1と、この平行平板P1を介したマスクRからの光を反射して反射屈折光学系Aへ導くための平面反射鏡M1とを備えている。反射屈折光学系Aは、マスクRからの光の入射側から順に、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL1と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL2と、入射側に凸面を向けた負メニスカスレンズL3と、入射側に凹面を向けた凹面反射鏡M2とから構成されている。したがって、マスクRからの光は、平行平板P1を透過し、平面反射鏡M1で反射された後に、反射屈折光学系Aへ入射する。反射屈折光学系Aへ入射した光は、4つのレンズ成分L1~L4を介して凹面反射鏡M2に入射する。凹面反射鏡M2で反射された光は、4つのレンズ成分L4~L1を介して、マスクパターンの中間像を形成する。

【0046】マスクパターンの中間像からの光は、屈折

(主要諸元)

$\lambda = 157.6 \text{ nm}$

FWHM: 2 μm

$\beta = 1/4$

NA=0.65

光学系Bに導かれる。屈折光学系Bは、中間像からの光の入射側から順に、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL5と、両凸レンズL6と、両凹レンズL7と、入射側に凹面を向けた正メニスカスレンズL8と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL9と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL10と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL11と、両凸レンズL12と、入射側に凹面を向けた負メニスカスレンズL13と、両凸レンズL14とから構成されている。なお、正メニスカスレンズL10と正メニスカスレンズL11との間の光路中には、開口絞りSが配置されている。

【0047】したがって、マスクパターンの中間像から屈折光学系Bに入射した光は、各レンズ成分L5~L14を介して、ウエハW(図3では参照符号8に対応)上の露光領域においてマスクパターンの縮小像を形成する。なお、上述したように、凹面反射鏡M2から両凸レンズL14までの光路中において、凹面反射鏡M2およびすべてのレンズ成分L1~L14は共通の光軸AXに沿って配置されている。なお、第1実施例の投影光学系においては、平面鏡M1は反射屈折光学系Aと屈折光学系Bとの間の光路中であってこれら両光学系A、Bの光軸を含まない位置に光軸に対して45°で斜設されている。従って、反射屈折光学系Aから屈折光学系Bへ向かう光束は、光軸を挟んで平面鏡M1の反対側の空間を通過する。

【0048】次の表(1)に、第1実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表(1)において、 λ は露光光の中心波長を、FWHMは露光光の半値全幅を、 β は投影倍率を、NAは像側開口数をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウエハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの面の順序を、 r は各面の曲率半径(非球面の場合には頂点曲率半径)を、 d は各面の軸上間隔すなわち面間隔を、 n は中心波長に対する屈折率をそれぞれ示している。

【0049】なお、面間隔 d は、反射される度にその符号を変えるものとする。したがって、面間隔 d の符号は、平面反射鏡M1から凹面反射鏡M2までの光路中では負とし、その他の光路中では正としている。そして、面間隔 d が正である光路中においては、光線の入射側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。逆に、面間隔 d が負である光路中においては、光線の入射側に向かって凹面の曲率半径を正とし、凸面の曲率半径を負としている。

【0050】

【表1】

(光学部材諸元)

面番号	r	d	n	
	(マスク面)			
1	∞	20.000000	1.5600000	(P1)
2	∞	10.000000		
3	∞	95.000000		
4	-429.08398	-147.362588		(M1)
5*	-745.13029	-30.000000	1.5600000	(L1)
6	-322.16303	-1.333333		
7*	-322.16303	-40.000000	1.5600000	(L2)
8	-1467.70271	-167.804804		
9*	-1453.48942	-30.000000	1.5600000	(L3)
10*	-499.97211	-270.398999		
11	169.56369	-24.634368	1.5600000	(L4)
12	1553.82168	-29.845669		
13	270.33617	29.845669		(M2)
14*	1553.82168	24.634368	1.5600000	(L4)
15*	169.56369	270.398999		
16	-499.97211	30.000000	1.5600000	(L3)
17*	-1453.48942	167.804804		
18	-1467.70271	40.000000	1.5600000	(L2)
19*	-322.16303	1.333333		
20	-322.16303	30.000000	1.5600000	(L1)
21	-745.13029	30.000000		
22*	-429.08398	367.362588		
23	251.44318	56.000000	1.5600000	(L5)
24*	331.45187	0.100000		
25	242.35691	64.000000	1.5600000	(L6)
26*	-435.60082	41.312455		
27	-383.72254	35.200000	1.5600000	(L7)
28*	234.88321	351.340242		
29	-368.96810	35.200000	1.5600000	(L8)
30*	-213.21187	0.100000		
31	222.15200	38.214400	1.5600000	(L9)
32*	644.25611	105.254071		
33	344.34732	34.000000	1.5600000	(L10)
34	670.73134	14.613691		
35	∞	22.968043		(S)
36	194.20796	25.000000	1.5600000	(L11)
37*	1066.41016	39.793405		
38	269.58088	47.757164	1.5600000	(L12)
39*	-250.46386	1.151770		
40	-252.91748	20.000000	1.5600000	(L13)
41*	-5180.17894	0.684288		
42*	115.59157	52.925003	1.5600000	(L14)
43	-306.38001	5.000940		

(ウエハ面)

(非球面データ)

	r	κ	C_4
5面	-745.13029	0.00000	-0.366339×10^{-8}
19面	C_8	C_2	C_{10}
	0.457313×10^{-13}	0.205872×10^{-16}	0.184274×10^{-21}

	r	κ	C_4
7面	-1467.70271	0.00000	0.846545×10^{-9}
17面	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.116191 \times 10^{-12}$	$-0.199473 \times 10^{-16}$	$-0.341653 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
9面	-499.97211	0.00000	-0.976158×10^{-6}
15面	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.415843 \times 10^{-13}$	0.162351×10^{-16}	0.411877×10^{-21}
	r	κ	C_4
10面	169.56369	0.00000	-0.133118×10^{-7}
14面	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.346654 \times 10^{-12}$	$-0.781223 \times 10^{-17}$	$-0.342202 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
22面	331.45187	0.00000	0.757965×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.101485 \times 10^{-12}$	0.496639×10^{-17}	0.112493×10^{-22}
	r	κ	C_4
24面	-435.60082	0.00000	0.751565×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.347171×10^{-12}	$-0.222122 \times 10^{-16}$	0.414382×10^{-21}
	r	κ	C_4
26面	234.88321	0.00000	0.330921×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.496173 \times 10^{-12}$	0.642966×10^{-16}	$-0.215905 \times 10^{-20}$
	r	κ	C_4
27面	-368.96810	0.00000	-0.772938×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.292091 \times 10^{-12}$	0.455626×10^{-17}	$-0.159769 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
30面	644.25611	0.00000	0.121893×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.203227 \times 10^{-12}$	0.838252×10^{-17}	$-0.132351 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
37面	-250.46386	0.00000	0.100880×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.464133×10^{-11}	$-0.276297 \times 10^{-14}$	0.186151×10^{-18}
	r	κ	C_4
39面	-5180.17894	0.00000	-0.212613×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.222172 \times 10^{-10}$	0.137730×10^{-13}	$-0.124632 \times 10^{-17}$
	r	κ	C_4
40面	115.59157	0.00000	-0.432337×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.741893 \times 10^{-11}$	0.488072×10^{-14}	0.112316×10^{-17}

【0051】図6は、第1実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。また、図7は、第1実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。各収差図において、NAは像側開口数を、Yは像高を、実線は中心波長157.6nmを、破線は157.6nm+1.3pmを、一点鎖線は15

7.6nm-1.3pmをそれぞれ示している。また、非点収差を示す収差図において、Sはサジタル像面を示し、Mはメリディオナル像面を示している。各収差図から明らかなように、第1実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が2pmの露光光に対して色収差を含む諸収差が良好に補正されていることがわかる。

【0052】(第2実施例)図8は、第2実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面(像面)とを結ぶ光軸を含みマスク面(物体面)に垂直な平面に沿った断面図である。また、図9は、図8に対応する図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面(像面)とを結ぶ光軸を含みマスク面に平行な平面に沿った断面図である。ただし、図8では、図面の明瞭化のために、反射鏡M1を省略し、反射鏡M1からマスクRまでの光路を紙面上で展開している。第2実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が10pmの露光光に対して色収差を含む諸収差が補正された投影光学系に本発明を適用している。

【0053】なお、第2実施例の投影光学系は、第1実施例と類似の構成を有する。しかしながら、第1実施例では露光光の半値全幅が2pmであるのに対し第2実施例では露光光の半値全幅が10pmである点、および第1実施例では反射屈折光学系Aが4つのレンズ成分を有するのに対し第2実施例では露光光の半値全幅の増大に対応して5つのレンズ成分を有する点が基本的に相違している。以下、第1実施例との相違点に着目して、第2実施例を説明する。

【0054】第2実施例の投影光学系は、マスクRに近接して配置された平行平板P1と、この平行平板P1を介したマスクRからの光を反射して反射屈折光学系Aへ導くための平面反射鏡M1とを備えている。反射屈折光学系Aは、マスクRからの光の入射側から順に、入射側に凸面を向けた負メニスカスレンズL1と、両凸レンズL2と、入射側に凸面を向けた負メニスカスレンズL3と、入射側に凹面を向けた負メニスカスレンズL4と、入射側に凹面を向けた凹面反射鏡M2とから構成されている。したがって、マスクRからの光は、平行平板P1を透過し、平面反射鏡M1で反射された後に、反射屈折光学系Aへ入射する。反射屈折光学系Aへ入射した光は、5つのレンズ成分L1～L5を介して凹面反射鏡M2に入射する。凹面反射鏡M2で反射された光は、5つのレンズ成分L5～L1を介して、マスクパターンの中間像を形成する。

【0055】マスクパターンの中間像からの光は、屈折

(主要諸元)

$\lambda = 157.6 \text{ nm}$

FWHM: 10 pm

$\beta = 1/4$

NA = 0.65

(光学部材諸元)

面番号	r	d	n
	(マスク面)	20.000000	
1	∞	10.000000	1.5600000 (P1)
2	∞	95.000000	
3	∞	-149.717330	(M1)

光学系Bに導かれる。屈折光学系Bは、中間像からの光の入射側から順に、両凸レンズL6と、両凸レンズL7と、両凹レンズL8と、両凹レンズL9と、入射側に凹面を向けた正メニスカスレンズL10と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL11と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL12と、入射側に凸面を向けた負メニスカスレンズL13と、両凸レンズL14と、両凸レンズL15とから構成されている。なお、正メニスカスレンズL12と負メニスカスレンズL13との間の光路中において正メニスカスレンズL12の近傍には、開口絞りSが配置されている。

【0056】したがって、マスクパターンの中間像から屈折光学系Bに入射した光は、各レンズ成分L6～L15を介して、ウエハW上の露光領域においてマスクパターンの縮小像を形成する。なお、上述したように、凹面反射鏡M2から両凸レンズL15までの光路中において、凹面反射鏡M2およびすべてのレンズ成分L1～L15は共通の光軸AXに沿って配置されている。

【0057】次の表(2)に、第2実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表(2)において、 λ は露光光の中心波長を、FWHMは露光光の半値全幅を、 β は投影倍率を、NAは像側開口数をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウエハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの面の順序を、rは各面の曲率半径(非球面の場合には頂点曲率半径)を、dは各面の軸上間隔すなわち面間隔を、nは中心波長に対する屈折率をそれぞれ示している。

【0058】なお、面間隔dは、反射される度にその符号を変えるものとする。したがって、面間隔dの符号は、平面反射鏡M1から凹面反射鏡M2までの光路中では負とし、その他の光路中では正としている。そして、面間隔dが正である光路中においては、光線の入射側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。逆に、面間隔dが負である光路中においては、光線の入射側に向かって凹面の曲率半径を正とし、凸面の曲率半径を負としている。

【0059】

【表2】

4	-682.92265	-30.000000	1.5600000	(L1)
5*	-588.26859	-1.333333		
6	-430.94316	-40.000000	1.5600000	(L2)
7*	1484.17685	-150.777176		
8	-267.06519	-30.000000	1.5600000	(L3)
9*	-264.72399	-271.803380		
10*	280.88127	-40.000000	1.5600000	(L4)
11	430.96701	-47.259520		
12*	173.49424	-24.634368	1.5600000	(L5)
13	875.59639	-23.962719		
14	283.82726	23.962719		(M2)
15	875.59639	24.634368	1.5600000	(L5)
16*	173.49424	47.259520		
17	430.96701	40.000000	1.5600000	(L4)
18*	280.88127	271.803380		
19*	-264.72399	30.000000	1.5600000	(L3)
20	-267.06519	150.777176		
21*	1484.17685	40.000000	1.5600000	(L2)
22	-430.94316	1.333333		
23*	-588.26859	30.000000	1.5600000	(L1)
24	-682.92265	369.717330		
25	238.57662	60.000000	1.5600000	(L6)
26*	-1018.49483	0.100000		
27	537.43794	60.000000	1.5600000	(L7)
28*	-1553.84088	5.862119		
29	-871.09012	33.333333	1.5600000	(L8)
30*	889.60239	20.205850		
31	-485.37887	35.200000	1.5600000	(L9)
32*	370.25580	345.890970		
33*	-374.83682	35.200000	1.5600000	(L10)
34	-212.27674	0.100000		
35	252.25212	34.214400	1.5600000	(L11)
36*	1101.27714	41.001563		
37	158.00018	43.110144	1.5600000	(L12)
38*	426.66235	11.751647		
39	∞	71.207438		(S)
40	261.87894	49.757164	1.5600000	(L13)
41*	129.89231	5.696443		
42	111.81396	20.000000	1.5600000	(L14)
43*	-713.41458	0.684288		
44*	139.86748	53.916336	1.5600000	(L15)
45	-390.69540	5.000000		

(ウエハ面)

(非球面データ)

	r	κ	C_4
5面	-588.26859	0.00000	-0.231151×10^{-8}
23面	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.107657 \times 10^{-12}$	0.679561×10^{-17}	0.200076×10^{-21}
	r	κ	C_4
7面	1484.17685	0.00000	0.208708×10^{-6}

2 1 面	C_6	C_8	C_{10}
	0.101520×10^{-12}	$-0.936224 \times 10^{-17}$	$-0.109080 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
9 面	-264.72399	0.00000	-0.596956×10^{-8}
1 9 面	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.804409 \times 10^{-13}$	0.594035×10^{-17}	$-0.511225 \times 10^{-22}$
	r	κ	C_4
1 0 面	280.88127	0.00000	-0.270202×10^{-8}
1 8 面	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.165650 \times 10^{-12}$	$-0.319705 \times 10^{-17}$	$-0.722147 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
1 2 面	173.49424	0.00000	-0.896367×10^{-8}
1 6 面	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.112007 \times 10^{-12}$	$-0.376263 \times 10^{-18}$	0.205531×10^{-22}
	r	κ	C_4
2 6 面	-1018.49483	0.00000	-0.161303×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.132885 \times 10^{-13}$	0.112230×10^{-16}	$-0.279049 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
2 8 面	-1553.84088	0.00000	0.178392×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.484443×10^{-13}	$-0.385332 \times 10^{-16}$	0.135532×10^{-20}
	r	κ	C_4
3 0 面	889.60239	0.00000	0.252762×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.592624×10^{-12}	0.146825×10^{-16}	$-0.127357 \times 10^{-20}$
	r	κ	C_4
3 2 面	370.255800	0.00000	-0.427239×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.252357 \times 10^{-12}$	0.611208×10^{-16}	0.198023×10^{-21}
	r	κ	C_4
3 3 面	-374.83682	0.00000	-0.713446×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.358473 \times 10^{-12}$	0.976519×10^{-17}	$-0.144877 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
3 6 面	1101.27714	0.00000	0.813610×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.519537 \times 10^{-12}$	0.103493×10^{-16}	0.452136×10^{-22}
	r	κ	C_4
3 8 面	426.66235	0.00000	0.202344×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.486990×10^{-12}	$-0.709243 \times 10^{-17}$	0.198192×10^{-21}
	r	κ	C_4
4 1 面	129.89231	0.00000	0.379939×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.248170×10^{-10}	0.278364×10^{-14}	0.221665×10^{-18}
	r	κ	C_4
4 3 面	-713.41458	0.00000	-0.142505×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
			$-0.128262 \times$

10^{-11}	0.598993×10^{-15}	0.779998×10^{-19}	
	r	κ	C_4
44面	139.86748	0.00000	-0.921480×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.175784×10^{-10}	0.573035×10^{-14}	0.703403×10^{-18}

【0060】図10は、第2実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。また、図11は、第2実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。各収差図において、NAは像側開口数を、Yは像高を、実線は中心波長157.6nmを、破線は157.6nm+8.6pmを、一点鎖線は157.6nm-8.6pmをそれぞれ示している。また、非点収差を示す収差図において、Sはサジタル像面を示し、Mはメリディオナル像面を示している。各収差図から明らかなように、第2実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が10pmの露光光に対して色収差を含む諸収差が良好に補正されていることがわかる。

【0061】〔第3実施例および第4実施例〕図12は、本発明の第3実施例および第4実施例にかかる投影露光装置の全体構成を概略的に示す図である。なお、図12において、ウエハ面の法線方向にZ軸を、ウエハ面内において図12の紙面に平行にX軸を、紙面に垂直にY軸を設定している。第3実施例および第4実施例は、第1実施例および第2実施例と類似の構成を有するが、投影光学系の構成が第1実施例および第2実施例と基本的に相違している。以下、第1実施例および第2実施例との相違点に着目し、第3実施例および第4実施例を説明する。

【0062】図示の投影露光装置において、F₂レーザ（発振中心波長157.6nm）1からX方向に射出された光は、折り曲げミラー2でZ方向に偏向された後、照明光学系3を介してマスク4を均一に照明する。なお、図12では、光源1から照明光学系3までの光路に1枚の折り曲げミラー2しか図示していないが、実際には、図3の例と同様に、自動追尾ユニットや、整形光学系および光量調整部などの光学系が配置される。また、図12に示した照明光学系3は、図3の例と同様にオプティカルインテグレータや、視野絞りおよび視野絞り結像光学系などの光学系を有している。図12の例においても図3の例と同様に、光源1と照明光学系3との間はケーシングC1で密封されており、光源1から照明光学系3中の最もマスクR側の光学部材までの空間はヘリウムガスなどの不活性ガスで置換されている。なお、光路の折り曲げ方は図12に示される態様には限られず、装置の設計に合わせて適宜変更可能であることは言うまでもない。マスク4は、マスクホルダ5を介して、マスクステージ6上においてXY平面に平行に保持されている。マスク4には転写すべきパターンが形成されており、パターン領域全体のうちY方向に沿って長辺を有し

且つX方向に沿って短辺を有する矩形形状のパターン領域が照明される。マスクステージ6は、図示を省略した駆動系の作用によりマスク面（すなわちXY平面）に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はマスク移動鏡11を用いた干渉計12によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【0063】マスク4に形成されたパターンからの光は、投影光学系7を介して、感光性基板であるウエハ8上にマスクパターン像を形成する。ウエハ8は、ウエハホルダ9を介して、ウエハステージ10上においてXY平面に平行に保持されている。そして、マスク4上での矩形形状の照明パターン領域に光学的に対応するように、ウエハ8上においてもY方向に沿って長辺を有し且つX方向に沿って短辺を有する矩形形状の露光領域にパターン像が形成される。ウエハステージ10は、図示を省略した駆動系の作用によりウエハ面（すなわちXY平面）に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はウエハ移動鏡13を用いた干渉計14によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【0064】また、図示の投影露光装置では、投影光学系7を構成する光学部材のうち最もマスク側に配置された平行平板P1と最もウエハ側に配置されたレンズLrとの間で投影光学系7の内部が気密状態を保つように構成され、投影光学系7の内部の気体は露光光の吸収率が低い気体としてヘリウムガスで置換されている。同様に、光源1から照明光学系3までの光路もヘリウムガスで置換されている。そして、照明光学系3と平行平板P1との間の狭い光路には、マスク4及びマスクステージ6が配置されるが、これらマスク4及びマスクステージ6を密封包囲するケーシングC2の内部に窒素やヘリウムガスなどの不活性ガスを充填することにより、上記照明光学系3と平行平板P1との間の光路が不活性ガスで置換される。また、レンズLrとウエハ8との間の狭い光路には、ウエハ8及びウエハステージ10などが配置されるが、これらウエハ8及びウエハステージ10を密封包囲するケーシングC3の内部に窒素やヘリウムガスなどの不活性ガスを充填することにより、上記レンズLrとウエハ8との間の狭い光路が不活性ガスで置換される。ただし、これらの光路においては、機械的に可動する部材（マスクステージ6、ウエハステージ10など）が配置されているため、これらの部材が移動することによる気体のクリーン度の低下は避けがたい。なお、マスクを交換するためのロボットアームやウエハを交換するためのロボットアームは、上記光路のクリーン度を向上させるために、これらのケーシングC2、C3とは

別体のケーシング内に収められることが好ましいが、それでも投影光学系7の内部気体のクリーン度よりは低くなりがちである。このように、光源1からウエハ8までの光路において露光光がクリーン度の低い気体を通過する箇所は、照明光学系3とマスク4との間の狭い光路中、マスク4と平行平板P1との間の狭い光路中およびレンズL₁とウエハ8との間の狭い光路中である。

【0065】上述したように、投影光学系7によって規定されるマスク4上の視野領域（照明領域）およびウエハ8上の投影領域（露光領域）は、X方向に沿って短辺を有する矩形形状である。したがって、駆動系および干渉計（12、14）などを用いてマスク4およびウエハ8の位置制御を行いながら、矩形形状の露光領域および照明領域の短辺方向すなわちX方向に沿ってマスクステージ6とウエハステージ10とを、ひいてはマスク4とウエハ8とを同期的に走査させることにより、ウエハ8上には露光領域の長辺に等しい幅を有し且つウエハ8の走査量に応じた長さを有する領域に対してマスクパターンが走査露光される。このように、第3実施例および第4実施例では、マスク面とウエハ面とが平行であり、その走査方向が水平方向になるように設定されている。

【0066】（第3実施例）図13は、第3実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、反射屈折光学系Aの光軸AX1と屈折光学系Bの光軸AX2とを含む平面に沿った断面図である。第3実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が2μmの露光光に対して色収差を含む諸収差が補正された投影光学系に本発明を適用している。

【0067】図示の投影光学系は、特開平8-334695号公報に開示された光学系と同じタイプである。すなわち、第3実施例の投影光学系では、中間像形成位置の近傍において光束が細くなった位置に反射屈折光学系Aの光軸AX1に対して反射面が45度の角度をなす平面反射鏡M2を配置している。また、反射屈折光学系Aの光軸AX1と平行な光軸AX2を有する屈折光学系Bと反射屈折光学系Aとを光学的に接続するために、屈折光学系Bの光軸AX2に対して45度の角度をなし且つ平面反射鏡M2の反射面と直交する反射面を有する平面反射鏡M3を配置している。

【0068】したがって、第3実施例の投影光学系の場合、マスクR（図12では参照符号4に対応）の近傍に配置された平行平板P1と反射屈折光学系Aを構成するすべてのレンズ成分および凹面反射鏡M1とが光軸AX1上に配置され、屈折光学系Bを構成するすべてのレンズ成分が光軸AX1と平行な光軸AX2上に配置される。そして、図12に示すようにマスク4およびウエハ8を水平に支持する場合、投影光学系7を構成するすべてのレンズ成分も水平に支持されることになり、レンズ成分が重力の悪影響を受けにくいという利点がある。また、2つの平行な光軸AX1およびAX2に沿って反射

屈折光学系Aおよび屈折光学系Bが配置されるので、鏡筒の長さがあまり長くないという利点がある。

【0069】第3実施例の投影光学系は、マスクRに近接して配置された平行平板P1を備えており、この平行平板P1を透過したマスクRからの光が反射屈折光学系Aへ入射する。反射屈折光学系Aは、マスクRからの光の入射側から順に、両凹レンズL1と、両凸レンズL2と、入射側に凹面を向けた負メニスカスレンズL3と、入射側に凹面を向けた凹面反射鏡M1とから構成されている。したがって、マスクRからの光は、平行平板P1を透過した後に、反射屈折光学系Aへ入射する。反射屈折光学系Aへ入射した光は、3つのレンズ成分L1～L3を介して凹面反射鏡M1に入射する。凹面反射鏡M1で反射された光は、2つのレンズ成分L3およびL2を介して、平面反射鏡M2の近傍にマスクパターンの中間像を形成する。

【0070】マスクパターンの中間像からの光は、平面反射鏡M2および平面反射鏡M3を介して、屈折光学系Bに入射する。屈折光学系Bは、中間像からの光の入射側から順に、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL4と、両凸レンズL5と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL6と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL7と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL8と、両凸レンズL9とから構成されている。なお、正メニスカスレンズL6と正メニスカスレンズL7との間の光路中には、開口絞りSが配置されている。したがって、マスクパターンの中間像から屈折光学系Bに入射した光は、各レンズ成分L4～L9を介して、ウエハW（図12では参照符号8に対応）上の露光領域においてマスクパターンの縮小像を形成する。

【0071】次の表（3）に、第3実施例の投影光学系の諸元の値を掲げる。表（3）において、λは露光光の中心波長を、FWHMは露光光の半値全幅を、βは投影倍率を、NAは像側開口数をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウエハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの面の順序を、rは各面の曲率半径（非球面の場合には頂点曲率半径）を、dは各面の軸上間隔すなわち面間隔を、nは中心波長に対する屈折率をそれぞれ示している。

【0072】なお、面間隔dは、反射される度にその符号を変えるものとする。したがって、面間隔dの符号は、凹面反射鏡M1から平面反射鏡M2までの光路中では負とし、平面反射鏡M3からウエハ面までの光路中では負とし、その他の光路中では正としている。そして、面間隔dが正である光路中においては、光線の入射側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。逆に、面間隔dが負である光路中においては、光線の入射側に向かって凹面の曲率半径を正とし、凸面の曲率半径を負としている。

【0073】

【表3】

(主要諸元)

 $\lambda = 157.6 \text{ nm}$ FWHM: $2 \mu\text{m}$ $\beta = 1/4$

NA = 0.65

(光学部材諸元)

面番号	r	d	n	
	(マスク面)	20.000000		
1	∞	10.000000	1.5600000	(P1)
2	∞	21.056466		
3*	-410.25845	19.200000	1.5600000	(L1)
4	7622.04648	97.814420		
5	442.05840	38.000000	1.5600000	(L2)
6*	-460.79557	637.333293		
7*	-181.36058	24.000000	1.5600000	(L3)
8	-2202.35929	34.559790		
9	-295.90336	-34.559790		(M1)
10	-2202.35929	-24.000000	1.5600000	(L3)
11*	-181.36058	-637.333293		
12*	-460.79557	-38.000000	1.5600000	(L2)
13	442.05840	-8.600000		
14	∞	410.000000		(M2)
15	∞	-107.846514		(M3)
16*	-271.59461	-40.000000	1.5600000	(L4)
17	-294.15246	-221.080055		
18	-736.15276	-50.000000	1.5600000	(L5)
19*	534.11318	-63.960648		
20	-178.13615	-46.000000	1.5600000	(L6)
21*	-558.07630	-31.709633		
22	∞	-107.125647		(S)
23	-124.45291	-40.000000	1.5600000	(L7)
24*	-701.01490	-2.857325		
25	-187.95248	-35.000000	1.5600000	(L8)
26	-535.34602	-0.651637		
27	-195.99609	-46.806762	1.5600000	(L9)
28*	7665.52661	-6.232089		

(ウエハ面)

(非球面データ)

	r	κ	C_4
3面	-410.25845	0.00000	-0.464328×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.289652×10^{-12}	0.876203×10^{-17}	$-0.101393 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
6面	-460.79557	0.00000	0.655550×10^{-8}
12面	C_6	C_8	C_{10}
	0.750690×10^{-13}	$-0.375816 \times 10^{-18}$	$-0.275978 \times 10^{-23}$
	r	κ	C_4
7面	-181.36058	0.00000	0.947631×10^{-8}
11面	C_6	C_8	C_{10}

	0.247890×10^{-12}	0.374299×10^{-17}	0.263940×10^{-21}
	r	κ	C_4
16面	-271.59461	0.00000	0.427427×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.411417×10^{-13}	0.204209×10^{-18}	$-0.710805 \times 10^{-23}$
	r	κ	C_4
19面	534.11318	0.00000	0.564196×10^{-8}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.362399 \times 10^{-15}$	$-0.263491 \times 10^{-17}$	0.420225×10^{-22}
	r	κ	C_4
21面	-558.07630	0.00000	-0.314496×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.185759×10^{-13}	$-0.161021 \times 10^{-17}$	$-0.415783 \times 10^{-21}$
	r	κ	C_4
24面	-701.01490	0.00000	-0.337626×10^{-7}
	C_6	C_8	C_{10}
	0.160965×10^{-12}	$-0.735123 \times 10^{-17}$	0.441992×10^{-21}
	r	κ	C_4
28面	7665.52661	0.00000	-0.152895×10^{-6}
	C_6	C_8	C_{10}
	$-0.665509 \times 10^{-10}$	0.938735×10^{-13}	$-0.520573 \times 10^{-16}$

【0074】図14は、第3実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。また、図15は、第3実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。各収差図において、NAは像側開口数を、Yは像高を、実線は中心波長157.6nmを、破線は157.6nm+1.3pmを、一点鎖線は157.6nm-1.3pmをそれぞれ示している。また、非点収差を示す収差図において、Sはサジタル像面を示し、Mはメリディオナル像面を示している。各収差図から明らかなように、第3実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が2pmの露光光に対して色収差を含む諸収差が良好に補正されていることがわかる。

【0075】〔第4実施例〕図16は、第4実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、反射屈折光学系Aの光軸AX1と屈折光学系Bの光軸AX2とを含む平面に沿った断面図である。第4実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が10pmの露光光に対して色収差を含む諸収差が補正された投影光学系に本発明を適用している。

【0076】第4実施例の投影光学系は、第3実施例と類似の構成を有する。しかしながら、第3実施例では露光光の半値全幅が2pmであるのに対し第4実施例では露光光の半値全幅が10pmである点、および第3実施例では屈折光学系Bが6つのレンズ成分を有するのに対し第4実施例では露光光の半値全幅の増大に対応して7つのレンズ成分を有する点が基本的に相違している。以下、第3実施例との相違点に着目して、第4実施例を説明する。

【0077】第4実施例の投影光学系は、マスクRに近

接して配置された平行平板P1を備えており、この平行平板P1を透過したマスクRからの光が反射屈折光学系Aへ入射する。反射屈折光学系Aは、マスクRからの光の入射側から順に、両凹レンズL1と、両凸レンズL2と、入射側に凹面を向けた負メニスカスレンズL3と、入射側に凹面を向けた凹面反射鏡M1とから構成されている。したがって、マスクRからの光は、平行平板P1を透過した後に、反射屈折光学系Aへ入射する。反射屈折光学系Aへ入射した光は、3つのレンズ成分L1~L3を介して凹面反射鏡M1に入射する。凹面反射鏡M1で反射された光は、2つのレンズ成分L3およびL2を介して、平面反射鏡M2の近傍にマスクパターンの中間像を形成する。

【0078】マスクパターンの中間像からの光は、平面反射鏡M2および平面反射鏡M3を介して、屈折光学系Bに入射する。屈折光学系Bは、中間像からの光の入射側から順に、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL4と、両凸レンズL5と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL6と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL7と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL8と、入射側に凸面を向けた正メニスカスレンズL9と、両凸レンズL10とから構成されている。なお、正メニスカスレンズL6と正メニスカスレンズL7との間の光路中には、開口絞りSが配置されている。したがって、マスクパターンの中間像から屈折光学系Bに入射した光は、各レンズ成分L4~L10を介して、ウェハW上の露光領域においてマスクパターンの縮小像を形成する。

【0079】次の表(4)に、第4実施例の投影光学系

の諸元の値を掲げる。表(4)において、 λ は露光光の中心波長を、FWHMは露光光の半値全幅を、 β は投影倍率を、NAは像側開口数をそれぞれ表している。また、面番号は物体面であるマスク面から像面であるウエハ面への光線の進行する方向に沿ったマスク側からの面の順序を、 r は各面の曲率半径(非球面の場合には頂点曲率半径)を、 d は各面の軸上間隔すなわち面間隔を、 n は中心波長に対する屈折率をそれぞれ示している。

【0080】なお、面間隔 d は、反射される度にその符号を変えるものとする。したがって、面間隔 d の符号

(主要諸元)

$\lambda = 157.6 \text{ nm}$

FWHM: 10 pm

$\beta = 1/4$

NA = 0.65

(光学部材諸元)

面番号	r	d	n	
(マスク面)		20.000000		
1	∞	10.000000	1.5600000	(P1)
2	∞	18.000000		
3*	-372.48390	19.200000	1.5600000	(L1)
4	2824.40505	107.691386		
5	441.56209	38.000000	1.5600000	(L2)
6*	-467.54839	632.035292		
7*	-181.16467	24.000000	1.5600000	(L3)
8	-2171.42735	34.435069		
9	-295.94748	-34.435069		(M1)
10	-2171.42736	-24.000000	1.5600000	(L3)
11*	-181.16467	-632.035292		
12*	-467.54839	-38.000000	1.5600000	(L2)
13	441.56209	-8.600000		
14	∞	410.000000		(M2)
15	∞	-96.164001		(M3)
16*	-248.89382	-40.000000	1.5600000	(L4)
17	-270.80367	-211.283468		
18	-1633.27164	-50.000000	1.5600000	(L5)
19*	439.76407	-84.131385		
20	-187.72487	-42.000000	1.5600000	(L6)
21*	-508.63497	-38.738249		
22	∞	-19.402019		(S)
23	-312.42160	-30.000000	1.5600000	(L7)
24	-545.38881	-68.496963		
25	-133.13377	-40.000000	1.5600000	(L8)
26*	-678.53406	-2.925194	27 -186.00220	-35.000000 1.5
600000				
(L9)				
28	-305.28790	-0.100000		
29	-145.48941	-46.223734	1.5600000	(L10)
30*	4767.12784	-6.000000		
(ウエハ面)				
(非球面データ)				

は、凹面反射鏡M1から平面反射鏡M2までの光路中では負とし、平面反射鏡M3からウエハ面までの光路中では負とし、その他の光路中では正としている。そして、面間隔 d が正である光路中においては、光線の入射側に向かって凸面の曲率半径を正とし、凹面の曲率半径を負としている。逆に、面間隔 d が負である光路中においては、光線の入射側に向かって凹面の曲率半径を正とし、凸面の曲率半径を負としている。

【0081】

【表4】

3面	r	κ	C_4
	-372.48390	0.00000	-0.540343×10^{-8}
	C_2	C_8	C_{10}
	0.256808×10^{-12}	0.290465×10^{-17}	$-0.427034 \times 10^{-22}$
6面	r	κ	C_4
	-467.54839	0.00000	0.622527×10^{-8}
12面	C_2	C_8	C_{10}
	0.649449×10^{-13}	$-0.506658 \times 10^{-18}$	0.357490×10^{-24}
7面	r	κ	C_4
	-181.16467	0.00000	0.943076×10^{-8}
11面	C_2	C_8	C_{10}
	0.256514×10^{-12}	0.303718×10^{-17}	0.242059×10^{-21}
16面	r	κ	C_4
	-248.89382	0.00000	0.609993×10^{-8}
	C_2	C_8	C_{10}
	0.765145×10^{-13}	0.840211×10^{-18}	0.133482×10^{-22}
19面	r	κ	C_4
	439.76407	0.00000	0.481334×10^{-8}
	C_2	C_8	C_{10}
	0.266384×10^{-13}	$-0.149214 \times 10^{-17}$	0.265666×10^{-22}
21面	r	κ	C_4
	-508.63497	0.00000	-0.270625×10^{-7}
	C_2	C_8	C_{10}
	$-0.130088 \times 10^{-12}$	0.121838×10^{-18}	$-0.449102 \times 10^{-21}$
26面	r	κ	C_4
	-678.53406	0.00000	-0.463518×10^{-8}
	C_2	C_8	C_{10}
	$-0.381221 \times 10^{-12}$	0.156702×10^{-16}	$-0.489031 \times 10^{-21}$
30面	r	κ	C_4
	4767.12784	0.00000	-0.195812×10^{-6}
	C_2	C_8	C_{10}
	0.241786×10^{-10}	$-0.201056 \times 10^{-13}$	0.142658×10^{-16}

【0082】図17は、第4実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。また、図18は、第4実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。各収差図において、NAは像側開口数を、Yは像高を、実線は中心波長157.6nmを、破線は157.6nm+8.6pmを、一点鎖線は157.6nm-8.6pmをそれぞれ示している。また、非点収差を示す収差図において、Sはサジタル像面を示し、Mはメリディオナル像面を示している。各収差図から明らかなように、第4実施例では、中心波長が157.6nmで半値全幅が10pmの露光光に対して色収差を含む諸収差が良好に補正されていることがわかる。

【0083】以上のように、上述の各実施例にかかる投影露光装置では、180nm以下の中心波長を有し且つ20pm以下の半値全幅を有する露光光に対して色収差が良好に補正された反射屈折タイプの投影光学系を備えているので、露光光源として比較的簡単な狭帯域化を施

したF₂レーザを使用することができる。この構成により、大きな露光パワーを得ることができ、レーザ光源のメンテナンスコストも安くなるので、レーザ光源に掛かるコストが低く且つ高い生産性を有する投影露光装置を実現することができる。

【0084】また、前述したように、F₂レーザの場合、半値全幅が2pm程度までの狭帯域化は可能と考えられる。上述の第1実施例および第3実施例に示すように半値全幅が2pm程度のF₂レーザを用いる場合、半値全幅が10pm程度のF₂レーザを用いる第2実施例および第4実施例の場合よりも、投影光学系を構成するレンズ成分の枚数を減らすことができる。硝材として使用される蛍石（すなわちCaF₂結晶）は高価であり、また180nm以下の短波長ではレンズ表面での光量損失が無視できない程度に大きいので、投影光学系の透過効率に関してレンズ枚数を減らすことの効果は大きい。

【0085】なお、上述の第1実施例および第2実施例の投影光学系では、マスク近傍に配置された平行平板

および光路分離用の平面反射鏡を除き、投影光学系を構成するすべてのレンズ成分および凹面反射鏡が共通の光軸に沿って配置されている。その結果、すべてのレンズ成分および凹面反射鏡を一本の鏡筒の内部に組み込むことができるので、反射屈折光学系としては組立ておよび調整を容易に行うことができる。また、上述の第3実施例および第4実施例の投影光学系では、光路分離用の平面反射鏡を除き、投影光学系を構成するすべてのレンズ成分および凹面反射鏡が互いに平行な2つの光軸に沿って配置されている。その結果、一部のレンズ成分および凹面反射鏡を第1の鏡筒の内部に組み込むとともに、残部のレンズ成分を第1の鏡筒と平行に配置された第2の鏡筒の内部に組み込むことができる。このように、2つの鏡筒の各々において組立および調整が独立的に可能であり、2つの鏡筒の間の相互位置関係も簡素化されているので、光学系の組立ておよび調整を比較的容易に行うことができる。

【0086】さらに、上述の各実施例では、露光領域が矩形状（スリット形状）であるため、露光領域が輪帯状である装置よりも照明光学系の設計および製造において好都合であり、照明光学系の構成を簡素化することができる。また、上述の各実施例では、マスクに近接して平行平板を配置することにより、マスクと平行平板との間の狭い光路およびウエハとこれに近接する光学部材との間の狭い光路を除き、マスクからウエハまでの光路のほぼ全部をクリーン度の高いヘリウムガスなどの不活性ガスで満たすことができる。その結果、露光光として F_2 レーザ光のような短波長光を用いても、光の吸収を有効に回避することができ、投影光学系の透過効率を向上させることができる。平行平板の使用により、投影光学系の耐久性および保守性を向上させ、投影光学系の組立後に残存収差の補正を行うこともできる。

【0087】さて、上述の各実施例にしたがう投影露光装置は、以下の手法により製造することができる。まず、 180 nm よりも短い中心波長の照明光によってマスク上のパターンを照明するための照明光学系を準備する。具体的には、中心波長が 157.6 nm の F_2 レーザ光を用いてマスクパターンを照明する照明光学系を準備する。このとき、照明光学系は、半値全幅 20 pm 以内のスペクトル幅の照明光を供給するように構成される。なお、半値全幅 2 pm 以内のスペクトル幅の照明光を供給するものを適用しても良い。次いで、マスク上のパターンの像を感光性基板上の感光面に結像するための投影光学系を準備する。投影光学系を準備することは、複数の屈折性光学素子を準備して、これら複数の屈折性光学素子を組上げることを含むものである。そして、これらの照明光学系および投影光学系を前述の機能を達成するように電気的、機械的または光学的に連結することにより、各実施例にかかる投影露光装置を製造することができる。

【0088】また、上述の各実施例では、投影光学系を屈折性の光学部材で構成し、この光学部材の材料として CaF_2 （フッ化カルシウム）を使用しているが、この CaF_2 に加えて、あるいは CaF_2 に代えて、例えばフッ化バリウム、フッ化リチウム、およびフッ化マグネシウムなどのフッ化物の結晶材料やフッ素がドーブされた石英を使用しても良い。但し、マスクを照明する照明光において十分な狭帯化が可能であるならば、投影光学系は単一種類の光学材料で構成することが好ましい。さらに、投影光学系の製造のし易さや製造コストを考えると、投影光学系は CaF_2 のみで構成されることが好ましい。

【0089】なお、上述の各実施例では、光源からウエハへ至る光路をヘリウムガスで置換しているが、光路の一部あるいは全部を窒素（ N_2 ）ガスで置換しても良い。さらに、上述の各実施例では、光源として F_2 レーザを用い、狭帯化装置によりそのスペクトル幅を狭帯化しているが、その代わりに、 157 nm に発振スペクトルを持つYAGレーザなどの固体レーザの高調波を用いるようにしても良い。また、DFB半導体レーザまたはファイバーレーザから発振される赤外域または可視域の単一波長レーザ光を、例えばエルビウム（またはエルビウムとイットリビウムとの両方）がドーブされたファイバーアンプで増幅し、非線形光学結晶を用いて紫外光に波長変換した高調波を用いても良い。

【0090】例えば、単一波長レーザ光の発振波長を $1.51\sim 1.59\text{ }\mu\text{m}$ の範囲内とすると、発生波長が $151\sim 159\text{ nm}$ の範囲内である10倍高調波が出力される。特に発振波長を $1.57\sim 1.58\text{ }\mu\text{m}$ の範囲内とすると、発生波長が $157\sim 158\text{ nm}$ の範囲内の10倍高調波、すなわち F_2 レーザ光とほぼ同一波長となる紫外光が得られる。また、発振波長を $1.03\sim 1.12\text{ }\mu\text{m}$ の範囲内とすると、発生波長が $147\sim 160\text{ nm}$ の範囲内である7倍高調波が出力され、特に発振波長を $1.099\sim 1.106\text{ }\mu\text{m}$ の範囲内とすると、発生波長が $157\sim 158\text{ }\mu\text{m}$ の範囲内の7倍高調波、すなわち F_2 レーザ光とほぼ同一波長となる紫外光が得られる。なお、単一波長発振レーザとしては、イットリビウム・ドーブ・ファイバーレーザを用いる。

【0091】このように、レーザ光源からの高調波を使用する場合には、この高調波自体が十分に狭帯化されたスペクトル幅（例えば 0.01 pm 程度）であるので、上述の各実施例の光源1の代わりに用いることができる。さて、本発明は、ウエハ上の1つのショット領域へマスクパターン像を一括的に転写した後に、投影光学系の光軸と直交する面内でウエハを逐次二次元的に移動させて次のショット領域にマスクパターン像を一括的に転写する工程を繰り返すステップ・アンド・リピート方式（一括露光方式）や、ウエハの各ショット領域への露光時にマスクとウエハとを投影光学系に対して投影倍率 β

を速度比として同期走査するステップ・アンド・スキャン方式（走査露光方式）の双方に適用することができる。なお、ステップ・アンド・スキャン方式では、スリット状（細長い矩形状）の露光領域内で良好な結像特性が得られればよい。そのため、投影光学系を大型化することなく、ウエハ上のより広いショット領域に露光を行うことができる。

【0092】ところで、上述の各実施例では、縮小投影光学系を用いているが、投影光学系は縮小系に限定されることなく等倍系または拡大系（例えば液晶ディスプレイ製造用露光装置など）を用いても良い。さらに、半導体素子の製造に用いられる露光装置だけでなく、液晶表示素子などを含むディスプレイの製造に用いられる、デバイスパターンをガラスプレート上に転写する露光装置、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられる、デバイスパターンをセラミックウエハ上に転写する露光装置、撮像素子（CCDなど）の製造に用いられる露光装置などにも本発明を適用することができる。また、レチクルまたはマスクを製造するためにガラス基板またはシリコンウエハなどに回路パターンを転写する露光装置にも、本発明を適用することができる。なお、本発明は上述の実施の形態に限定されることなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得ることは勿論である。

【0093】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、 F_2 レーザ光のような短波長光に対してレンズ枚数の少ない構成で色収差が良好に補正された反射屈折型の投影光学系を有する投影露光装置を実現することができる。すなわち、露光光源として比較的簡単な狭帯域化を施した F_2 レーザを使用することができるので、大きな露光パワーを得ることができる。また、レーザ光源のメンテナンスコストも安くなるので、レーザ光源に掛かるコストが低く且つ高い生産性を有する投影露光装置を実現することができる。

【0094】また、本発明では、マスクに近接して平行平板のような光透過性光学部材を配置することにより、マスクと平行平板との間の狭い光路およびウエハとこれに近接する光学部材との間の狭い光路を除き、マスクからウエハまでの光路のほぼ全部を、ヘリウムガスのような露光光を吸収しにくいクリーン度の高い気体で満たすことができる。その結果、露光光として F_2 レーザ光のような短波長光を用いても、光の吸収を有効に回避することができる。さらに、平行平板の使用により、投影光学系の耐久性および保守性を向上させ、投影光学系の組立後に残存収差の補正を行うこともできる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明にかかる投影露光装置の投影光学系の基本的な構成を概略的に説明する概念図である。

【図2】本発明においてウエハW面上において像形成に

使用し得る領域すなわち使用可能領域FR、および実際に露光に使用する露光領域ERを示す図である。

【図3】本発明の第1実施例および第2実施例にかかる投影露光装置の全体構成を概略的に示す図である。

【図4】第1実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面（像面）とを結ぶ光軸を含みマスク面（物体面）に垂直な平面に沿った断面図である。

【図5】図4に対応する図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面（像面）とを結ぶ光軸を含みマスク面に平行な平面に沿った断面図である。

【図6】第1実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。

【図7】第1実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。

【図8】第2実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面（像面）とを結ぶ光軸を含みマスク面（物体面）に垂直な平面に沿った断面図である。

【図9】図8に対応する図であって、凹面反射鏡M2とウエハ面（像面）とを結ぶ光軸を含みマスク面に平行な平面に沿った断面図である。

【図10】第2実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。

【図11】第2実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。

【図12】本発明の第3実施例および第4実施例にかかる投影露光装置の全体構成を概略的に示す図である。

【図13】第3実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、反射屈折光学系Aの光軸AX1と屈折光学系Bの光軸AX2とを含む平面に沿った断面図である。

【図14】第3実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。

【図15】第3実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。

【図16】第4実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図であって、反射屈折光学系Aの光軸AX1と屈折光学系Bの光軸AX2とを含む平面に沿った断面図である。

【図17】第4実施例における球面収差、非点収差および歪曲収差を示す図である。

【図18】第4実施例における横収差（メリディオナルコマ収差）を示す図である。

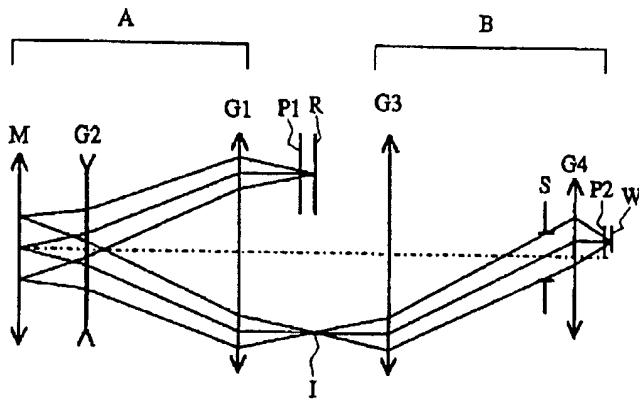
【符号の説明】

- 1 レーザ光源
- 2 ミラー
- 3 照明光学系
- 4、R マスク
- 5 マスクホルダ

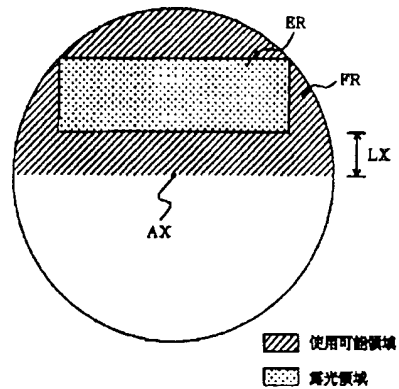
6 マスクステージ
7 投影光学系
8、W ウエハ
9 ウエハホルダ

10 ウエハステージ
11、13 移動鏡
12、14 干渉計

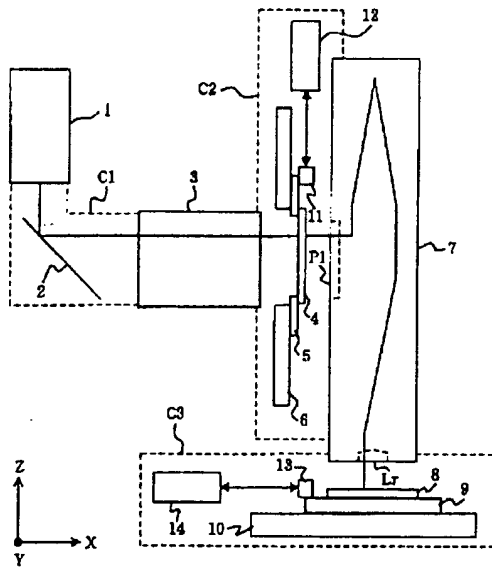
【図1】



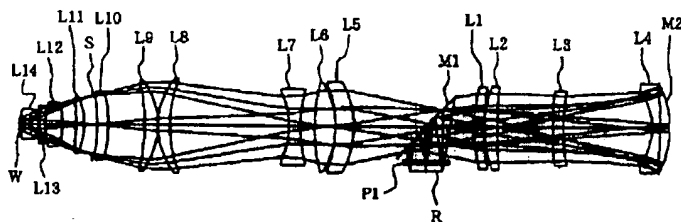
【図2】



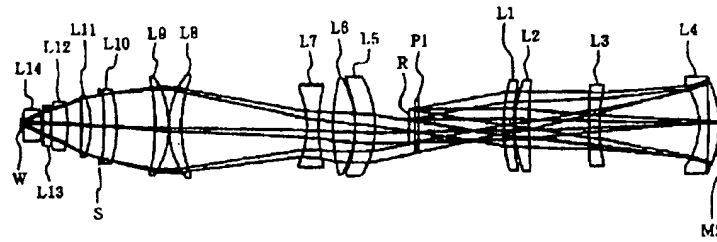
【図3】



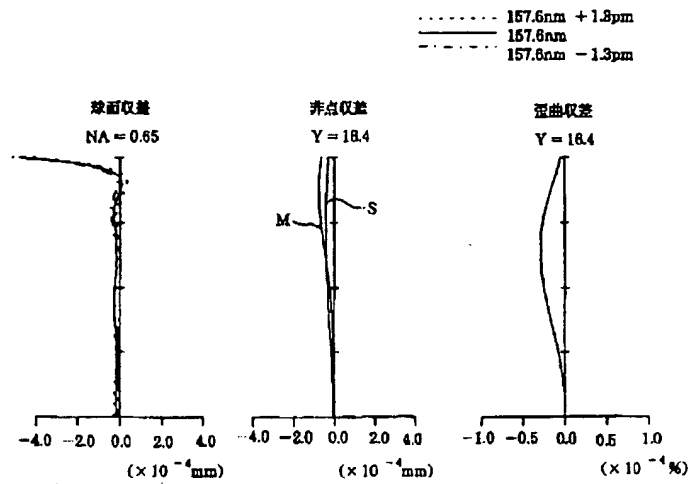
【図4】



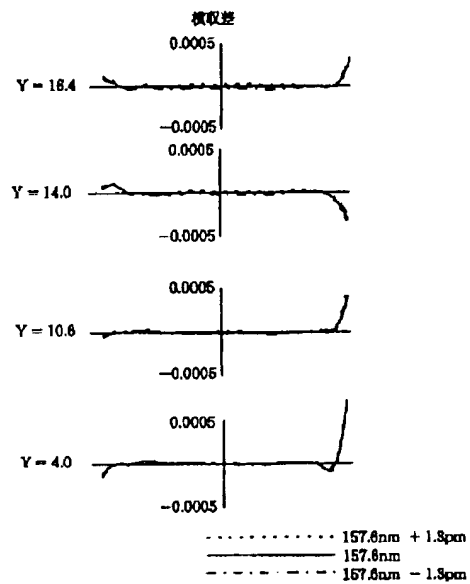
【図5】



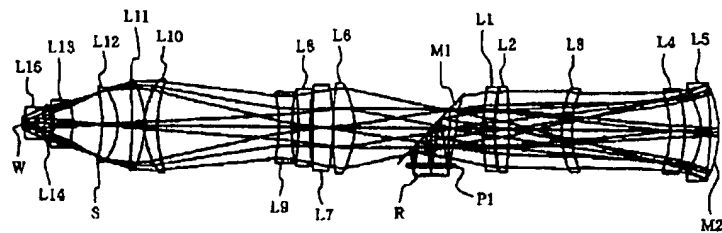
【図6】



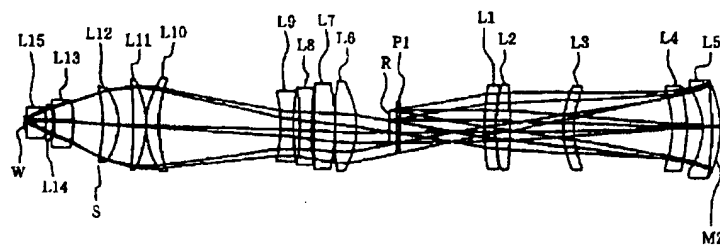
【図7】



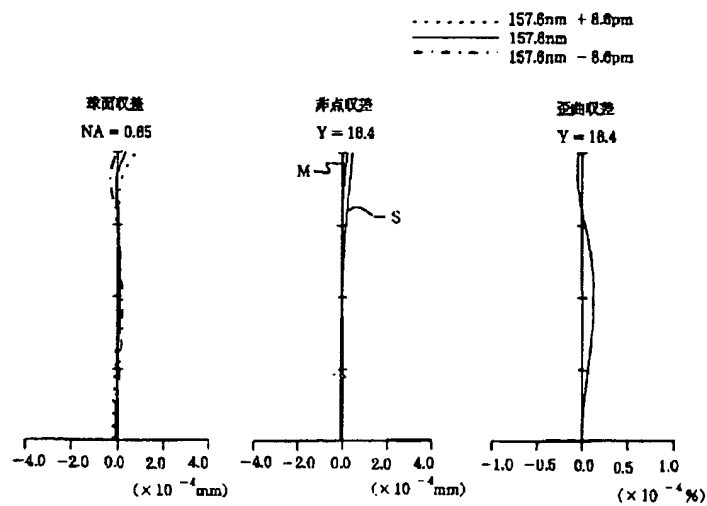
【図8】



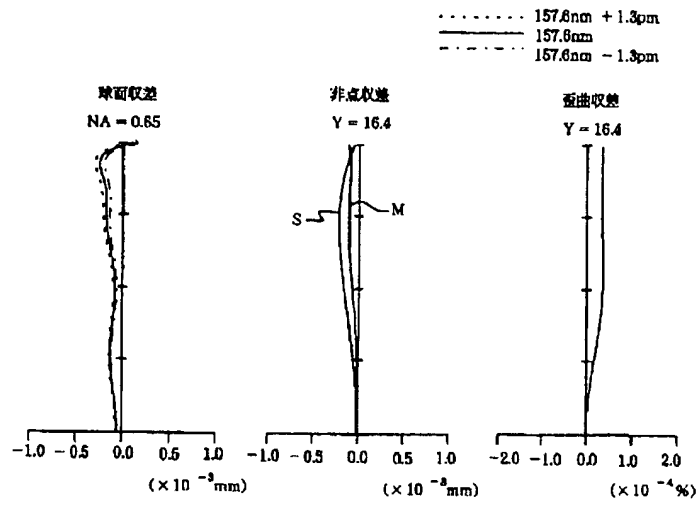
【図9】



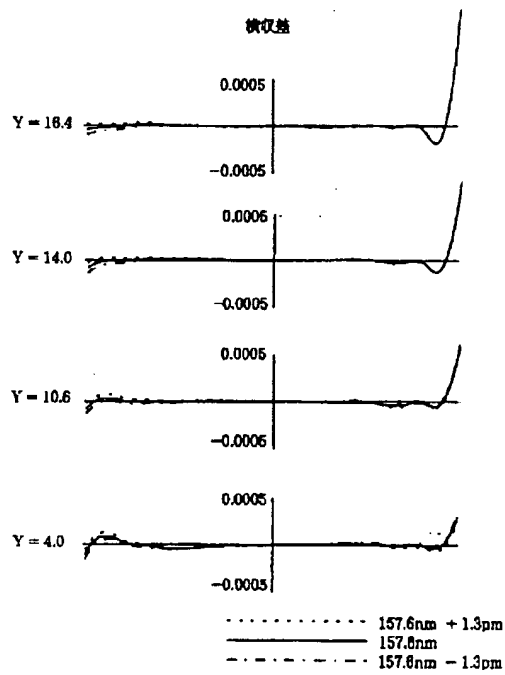
【図10】



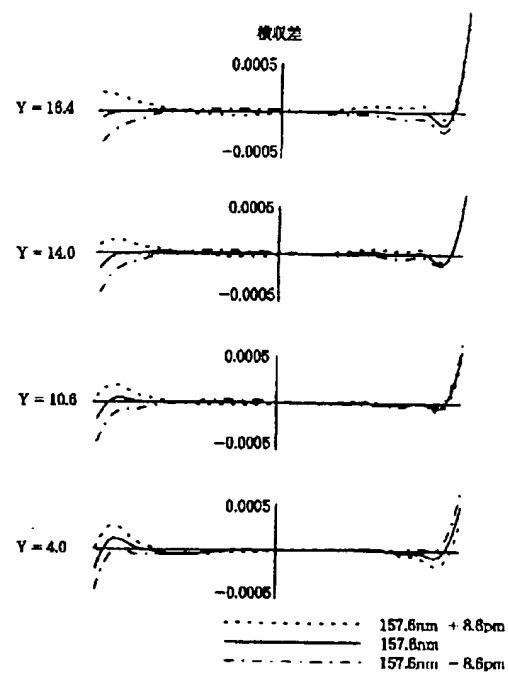
【图14】



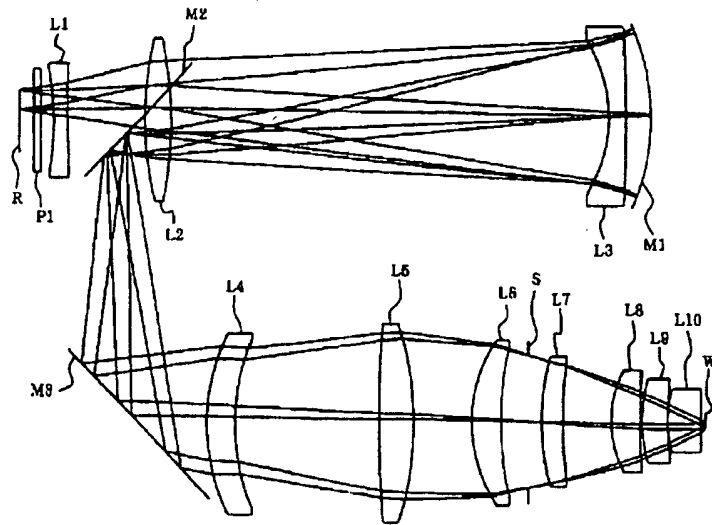
【图15】



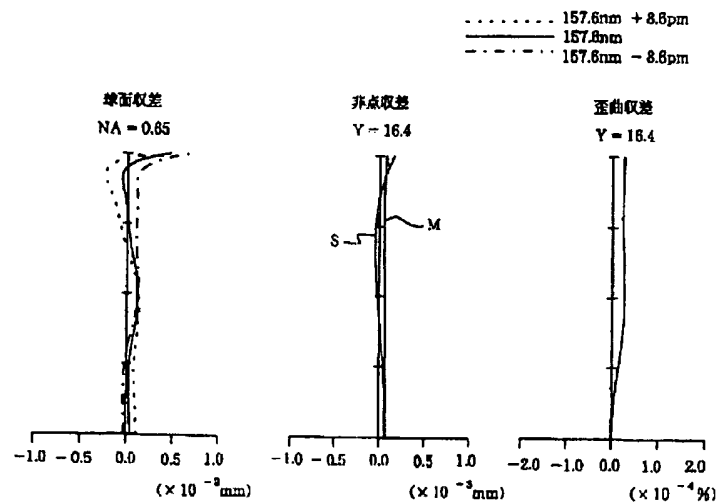
【图18】



【図16】



【図17】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. 7

識別記号

F I
 H 0 1 L 21/30

7-7コード(参考)
 5 1 5 B

(28) 100-195772 (P2000-1948)

Fターム(参考) 2H087 KA21 PA09 PA10 PA14 PA15
PA17 PB09 PB10 PB14 PB15
PB16 QA02 QA03 QA06 QA07
QA12 QA17 QA19 QA21 QA22
QA25 QA26 QA34 QA39 QA41
QA42 QA45 QA46 RA05 RA12
RA13 TA03 TA04 TA05
5F046 AA22 BA04 CA03 CA04 CA07
CB03 CB12 CB25